وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
مدیریت تحصیلات تکمیلی
گروه فلسفهٔ علم

رساله دکتری رشتهٔ فلسفهٔ علم و فناوری گرایش فلسفهٔ فیزیک

مبانی فلسفی اندازه‌گیری در مکانیک کوانتوم

استاد راهنما
دکتر مهدی گلشنی

استاد مشاور
دکتر امیراحسان کرباسی‌زاده

پژوهشگر
علیرضا منصوری

شهریور ماه ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
مدیریت تحصیلات تکمیلی
گروه فلسفهٔ علم

رساله دکتری رشتهٔ فلسفهٔ علم و فناوری گرایش فلسفهٔ فیزیک

مبانی فلسفی مسألهٔ اندازه‌گیری در مکانیک کوانتوم

استاد راهنما
دکتر مهدی گلشنی

استاد مشاور
دکتر امیراحسان کرباسی‌زاده

پژوهشگر

علیرضا منصوری

شهریور ماه ۱۳۹۱

تشکّر و قدردانی

" ... پس چون نعمتی از جانب خود به او عطا کنیم، می‌گوید: «تنها آن را به دانش خود یافته‌ام». در حالیکه چنین نیست، بلکه آن آزمایشی است، ولی بیشترشان نمی‌دانند." (زمر: ۴۹)

خداوند را شکرگزارم که ابتدا و انجام این رساله بی‌مدد او میسر نمی‌شد. انجام این رساله مرا وامدار عزیزانی کرده است که آوردن نام همهٔ آنها برایم مقدور نیست، اما وظیفهٔ خود می‌دانم خصوصاً از استاد بزرگوار و گرانقدرم جناب آقای دکتر مهدی گلشنی که در طی سال‌ها از محضر درس و هم‌صحبتی با ایشان حظّ وافر بردم و راهنمایی‌های مشفقانه و نکته‌سنجی‌های عالمانه و حمایت‌های بی‌دریغ ایشان دستمایه و سرمایه‌ای ارزنده برای من بود، سپاس و تشکّری ویژه به‌عمل آورم. استاد، دوست و همکار عزیزم جناب آقای دکتر کرباسی‌زاده همواره بی‌تکلّف مشوق من در این موضوع، و پذیرای اینجانب در جلسات مباحثهٔ دوستانه بودند، و دوست عزیزم جناب آقای دکتر شیخ‌رضایی زمینهٔ ارایهٔ سخنرانی در این مورد را برای من فراهم آوردند. نه‌تنها تذکرات نقادانه و اشارات سودمند جناب آقای دکتر شفیعی، حاکی از مطالعهٔ دقیق رساله بود و موجب بهبود کیفی آن شد، بلکه شیوهٔ مواجههٔ ایشان، به راقم این سطور آموخت که چطور می‌توان دقّت و وسواسِ بی‌گذشتِ علمی را به ظرافت با آیینِ فتوّت و رسم جوانمردی آمیخت و به تعبیر ابوسعید "شوخِ مَرد، به‌روی مَرد نیاورد"، و چگونه باید که در مسند قضاوت و داوری، جامهٔ مدّعی نپوشید و مرز این دو مقام را نگاه داشت. آقایان دکتر ایزدی و دکتر فهمی نیز نکات سودمندی را جهت تکمیل و بهبود رساله متذکر شدند. از همهٔ این عزیزان و همچنین از ریاست محترم پژوهشگاه علوم انسانی جناب آقای دکتر آیت‌اللهی به‌خاطر حمایت‌هایشان در تصویب موضوع رساله و تمدید مأموریت تحصیلی و تسهیل در امور اجرایی برگزاری جلسهٔ دفاع سپاسگزاری و تشکر می‌کنم.

انجام این رساله بدون حمایت‌های معنوی و دلگرمی‌هایِ پدر و مادر عزیزم و خصوصاً تحمل و صبوری‌های همسر مهربان و فداکارم میسر و مقدور نبود. من به‌راستی سپاسگزار این نیکخواهان و مددکارانم و برایشان آرزوی سرانجام نیک دارم. اما روزهای پایانیِ انجام این رساله، متأسفانه، مصادف با تلخ‌ترین ایام زندگیم شد، لذا این رساله را به برادرِ به سن کم‌تر، ولی به روح بزرگ‌ترم، تقدیم کردم که با کوچ زود هنگامش فرصت جبران مهربانی‌ها و حمایت‌هایش را به من نداد. روحش شاد.

علیرضا منصوری

تیرماه ۱۳۹۱

تقدیم به **برادر مهربانم مصطفی**

که فرصت جبران خوبی‌هایش را به من نداد.

چکیده

در این رساله ضمن طرح و تحلیل مسألهٔ اندازه‌گیری در مکانیک کوانتوم، مبانی فلسفی و مفهومیِ اهمّ مدل‌های ارایه شده برای مسألهٔ اندازه‌گیری، مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. در بخش دوم مدل جدیدی، تحت عنوان سیگما، برای حل مسألهٔ اندازه‌گیری پیشنهاد می‌کنیم. این مدل که تحت تأثیر متافیزیک چهاربعدگرایانهٔ صدرایی ارایه شده است، با در نظر گرفتن اجزاء زمانی برای اشیاء کوانتومی، تعبیر جدیدی برای بردار حالت کوانتومی به‌دست می‌دهد که تصویر قابل فهمی از برهم‌نهی‌ها ارایه می‌کند. ادعای مشخص رساله اینست که مدل سیگما، حداقل به‌اندازهٔ مدل‌های دیگر معقول است. در ارزیابی نهایی ضمن مقایسهٔ این مدل با برخی مدل‌های دیگر، به برنامه‌های پژوهشی آتی و مشترک این مدل با سایر مدل‌ها اشاره خواهد شد.

کلمات کلیدی: مسألهٔ اندازه‌گیری، مبانی فلسفی مکانیک کوانتوم، چهاربعدگرایی، مدل سیگما، اجزاء زمانی، متافیزیک صدرایی.

فهرست

مقدمه: مسألهٔ اندازه‌گیری چیست؟ ۱

صورتبندی دقیق‌تر مسألهٔ اندازه‌گیری ۴

طرح‌های ارایه شده برای مسألهٔ اندازه‌گیری ۶

بخش اول: بررسیِ مدل‌های ارایه شده برای مسألهٔ اندازه‌گیری

۱. تعبیر کپنهاگی و استاندارد **۲۰**

۱-۱- تعبیر کپنهاگی **۲۰**

۱-۲- آزمایش گربهٔ شرودینگر **۲۱**

۱-۳- تعبیر استاندارد **۲۲**

۲. مدل GRW **۲۷**

۲-۱- مفروضات و ایدهٔ اصلی **۲۷**

۲-۲- ارزیابی مدل GRW **۳٤**

۳. همدوسی‌زدایی **٤۲**

۳-۱- مسألهٔ اندازه‌گیری از دید طرفدارانِ همدوس‌زایی **٤۲**

۳-۲- درهم‌تنیدگی کوانتومی **٤۷**

۳-۳- معرفی ماتریس چگالی **٤۹**

۳-٤- مسألهٔ پایهٔ ارجح **٥٤**

۳-٥- همدوسی‌زدایی و تداخل **٥۷**

۳-٦- انتروپی و همدوسی‌زدایی ۵۹

۳-۷- ارزیابی همدوسی‌زدایی ٦۰

٤. تعبیر حالت نسبی ٦۹

٤-۱- تقریر نظریهٔ استاندارد از دید اورت ۷۰

٤-۲- نقد اورت به نظریهٔ استاندارد ۷۱

٤-۳- نظریهٔ حالت نسبی اورت و مسألهٔ اندازه‌گیری ۷۲

٤-۳- ۱- تعبیر سادهٔ نظریهٔ اِورت ۷۵

٤-۳- ۲- تعبیر چندجهانی ۷۸

٤-٤- ارزیابی چند جهانی ۷۹

۵. مدل بوهم ۸۳

۵-۱- معادلات بوهم ۸۷

۵-۲- راه‌حل بوهم برای مسألهٔ نتیجه ۹۱

۵-۳- مسألهٔ آمار ۹۸

۵-۳-۱- توجیه استعلایی ۱۰۲

۵-۳- ۲- آماده‌سازی ۱۰۳

۵-۳- ۳- دو نوع توجیه تعینی ۱۰۵

۵-٤- مسألهٔ اثر ۱۰۷

۵-۵- ارزیابی مدل بوهم ۱۱۲

بخش دوم: پیشنهاد یک متافیزیک جدید برای مسألهٔ اندازه‌گیری در مکانیک کوانتوم

٦. تعبیر سیگما ۱۱٤

٦-۱- نظریه، متافیزیک و واقعیت ۱۱۵

٦-۲- مروری بر اهم معضلات مدل‌های قبل ۱۱۹

٦-٣- نیاز به تعبیر و مقولات هستی شناسانهٔ جدید ۱۲۲
٦-٤- تصور رایج و عرفی از تحول و مشاهده ۱۲۵
٦-٥- مفاهیم اولیه ۱۲٦
٦-٦- مفهوم مشاهده و اندازه‌گیری در تصویر جدید ۱۲۸
٦-٧- تعبیر بردار حالت کوانتومی ۱۳۲
٦-٨- واقعیتِ متعین و واقعیتِ برهم‌نهی ۱٤۰
٦-٩- انتقادی علیه واقعیت برهم‌نهی ۱٤۳
٦-۱۰- تبیین توفیق‌های تبیینی و ملزومات تعابیر دیگر ۱٤٦
٦-۱۱- مسألهٔ آمار ۱۷۸
٦-۱۲- مسألهٔ اثر ۱۸٦
۷. بحث و نتیجه‌گیری ۱۹۰
ضمائم ۲۰۰
قضیه بل ۲۰۱
اپراتورهای چگالی، آنسامبل مخلوط و آنسامبلِ خالص ۲۰۵
اصطلاح‌نامه..... ۲۰٦
فهرست منابع ۲۰۸

مقدمه:

مسألهٔ اندازه‌گیری چیست؟

مواجههٔ فیزیکدانان در اواخر قرن نوزدهم با دو مسألهٔ اتر و تشعشع از یک جسم داغ و ناتوانیِ فیزیک کلاسیک در تبیین آنها منجر به تولد و تکون دو نظریهٔ مهم نسبیت خاص و نظریهٔ کوانتوم شد. در تقریرهای رسمی از مکانیک کوانتوم، یعنی آنچه عموماً در کتب درسی ارایه می‌شود، کم و بیش، اصولی شبیه آنچه در زیر می‌آید برای مکانیک کوانتوم برشمرده می‌شود:

اصل ۱: حالت ذره با یک بردار $|\psi(t)\rangle$ در فضای هیلبرت نمایش داده می‌شود.

اصل ۲: متغیرهای مستقل x و p با عملگرهای مستقل X و P، با عناصر ماتریسیِ زیر، در فضای X، نمایش داده می‌شوند:

$$\langle x|X|x'\rangle = x\delta(x-x'),$$
$$\langle x|P|x'\rangle = -i\hbar x\delta'(x-x')$$

و عملگرهای متناظر با متغیرهای وابسته نیز با جایگذاری مناسب به‌دست می‌آیند:

$$\Omega(X,P) = \omega(x \to X, p \to P)$$

اصل ۳: تحول زمانی بردار حالت، *قبل از اندازه‌گیری*، از معادلهٔ شرودینگر

$$i\hbar\frac{d}{dt}|\psi(t)\rangle = H|\psi(t)\rangle$$

تبعیت می‌کند.

اصل ۴: اگر ذره‌ای که در حالت $|\psi(t)\rangle$ قرار دارد، تحت عمل اندازه‌گیری روی متغیر متناظر با عملگر Ω قرار گیرد، نتیجهٔ اندازه‌گیری، با احتمال $P(\omega) \propto |\langle\omega|\psi\rangle|^2$، یکی از مقادیرویژهٔ ω خواهد بود. این اصل معمولاً به "فرض تقلیل"[1] شهرت دارد.

دانشجویان می‌آموزند که چگونه با به‌کارگیری این اصول به حلّ مسائل مربوطه بپردازند. اما خصوصاً بحث در مورد اینکه چرا تحول زمانیِ ذره، *قبل و بعد از اندازه‌گیری*، از دو اصل متفاوت تبعیت می‌کند، یا اینکه جزئیات فرایند تقلیل چیست، یا اینکه چه فرایندی 'اندازه‌گیری' محسوب می‌شود، مسکوت گذاشته می‌شود.

این رساله، چنانکه از عنوان آن بر می‌آید، تلاشی است برای بررسی پاسخ‌های ارایه شده برای پرسش‌های فوق که در ادبیاتِ بحث تحت عنوان 'مسألهٔ اندازه‌گیری' شناخته می‌شود. در این تحقیق، ضمن بررسیِ مسألهٔ اندازه‌گیری، به‌عنوان یکی از مسائل مهم مطرح شده از ابتدای پیدایش نظریهٔ کوانتوم، به ارزیابیِ مدل‌های مهم ارایه شده برای آن می‌پردازیم و در نهایت مدل جدیدی پیشنهاد می‌کنیم – با این انتظار که *حداقل* به‌اندازهٔ دیگر مدل‌ها معقول باشد. البته با توجه به اینکه این مسأله از مباحث مناقشه‌برانگیز فلسفهٔ مکانیک کوانتوم است و تاکنون تلاش بسیاری از محققین برجسته در حوزهٔ فیزیک و فلسفه به یک نتیجهٔ مورد اجماع نرسیده است، لذا به‌جای ادعای غیرواقع‌بینانهٔ ارایهٔ یک راه حل قطعی و نهایی برای آن، این مدل بیشتر با هدف یک تلاش فکری برای فهم این مسألهٔ خاص و تمرینی برای نظریه‌پردازی در مورد آن ارایه شده است.

قبل از توضیح این مسأله، خوبست ابتدا از شهود عام و عرفی خود شروع کنیم تا ببینیم چه تصور و تلقی‌ای از اندازه‌گیری داریم و پس از آن ببینیم نظریهٔ کوانتوم چگونه در تقابل با چنین شهودی قرار می‌گیرد. پیش‌فرض معمول ما در مورد اندازه‌گیری این است که سیستم مورد اندازه‌گیری، واجد کمیتی است و آن کمیت دارای مقداریست که ما آن را اندازه‌گیری می‌کنیم. بر مبنای این پیش‌فرض، اندازه‌گیری خاصیتی را آشکار می‌کند که سیستمْ از قبل واجد آن بوده است، بطوریکه حتی اگر اندازه‌گیری روی سیستم صورت *نگرفته* بود، سیستم دارای این خاصیت می‌بود.[2] مثلاً اندازه‌گیری مکانِ یک سیستمِ تک‌ذره‌ای را در نظر بگیرید. بر اساس آنچه گفتیم، ذره یا در یک محدودهٔ فضایی هست، یا نیست و اگر نظریهٔ مکانیک کوانتوم نتواند بگوید ذرهٔ مورد

[1] Collapse postulate

[2] به شکل بیان "شرطی خلاف واقع" آن توجه شود.

نظر در فلان موقعیت مکانی هست یا خیر، ظاهراً باید بپذیریم که مکانیک کوانتومْ نظریهٔ کاملی نیست. با چنین پیش‌فرضی راجع به *اندازه‌گیری*، پرسش ما راجع به موقعیتِ احتمالیِ مکـانِ یـک ذره چنـین مطـرح مـی‌شـود: *احتمال اینکه سیستم یا ذره در فلان موقعیت مکانی باشد چقدر است؟* اما اگر اصرار داشته باشیم، علیرغم اینکه نظریهٔ کوانتوم نمی‌گوید ذره، "*به‌طور مشخص*"، در کدام موقعیت مکانی است، با وجود این نظریه کامـل اسـت، لاجرم باید آن پیش‌فرض معمول را کنار بگذاریم و بپذیریم که قبل از اندازه‌گیری، ذره اصلاً مکـانِ مشخصـی نداشته و تازه پس از اندازه‌گیری است که دارای موقعیت مکانی مشخصی می‌شود. به این ترتیب در منظر جدید پرسش مذکور راجع به موقعیت احتمالی ذره را باید به این شکل طرح کرد کـه احتمـال اینکـه *اگـر سیسـتم را اندازه‌گیری کنیم*، ذره در فلان ناحیه *یافت شود* چقدر است؟ امّا در این‌صورت منظور از اینکـه سیسـتم *قبـل از اندازه‌گیریْ* مکان مشخصی ندارد، چیست؟ بر اساس تعبیر اخیر که تعبیر استاندارد است، باید گفت کـه قبـل از اندازه‌گیریْ سیستم در حالت خالصی قرار دارد که خود به صورت یک برهم‌نهی از آن حالات خالص است. پـس بطور خلاصه اگر مکانیک کوانتوم کامل باشد، یک حالت برهم‌نهی عجیب داریم[1].

تا اینجا مشخص شد که اگر نظریهٔ مکانیک کوانتوم را کامل در نظر بگیریم، تلقـی مـا از انـدازه‌گیـری چـه خواهد شد. برای توضیح دقیق‌تر فرض کنید سیستم قبلاً با یک دستگاه اندازه‌گیری برهم‌کنش داشـته و بـرای اندازه‌گیری یک کمیت، مقدار مشخصی را بدست داده باشد؛ اصطلاحاً می‌گوییم سیستم در یک حالـت خـالص[2] است. حالا انتظار ما اینست که اگر بلافاصله مجدداً همان اندازه‌گیری را انجام دهیم، نتیجه حتماً منجر به همان مقدار شود، زیرا اگر سیستم در حالت خالص باشد اندازه‌گیری مقدار قطعی (با احتمال ۱۰۰٪) را به‌دست می‌دهد. اگر این‌طور است پس عنصر شانس و احتمال از کجا می آید؟ در تعبیر استاندارد گفته می‌شود که عنصر شـانس و احتمال ناشی از فرایند تقلیل است؛ یعنی *تقلیل، شانس و احتمال را وارد می‌کند*. از طرفی تأکید می‌شـود کـه *پس از اندازه‌گیری*، ما همواره یک مقدار مشخص و متعین را به‌عنوان نتیجهٔ آزمایش به‌دست مـی‌آوریـم، ولـی *قبل از انجام عمل اندازه‌گیری* مشخص نیست که چه مقداری را به‌دست می‌آوریم.

[1] (Lange 2002:258)
[2] pure state

این نکته را نیز باید در نظر داشت که حالت برهم‌نهی برای جهان میکروفیزیک ضروریست. در نظریهٔ فعلی کوانتوم، اگر فرض چنین حالتی، به‌عنوان یک حالت واقعی، ضروری نبود، مشکلی در میان نبود، ولی همانطور که فاینمن اشاره کرده است، از آنجا که چنین حالاتِ برهم‌نهی امکان نمایش تداخل‌ها را برای ما تضمین می‌کنند و بدون آنها نمی‌توانستیم نمایش یا توضیحی برای تداخل‌ها ارایه کنیم، از آنها گریزی نیست[۱].

با این مقدمات می‌توان مسألهٔ اندازه‌گیری را به این شکل طرح کرد که "دینامیک کوانتومی و فرض تقلیل در تقابل آشکار با یکدیگر قرار دارند ... به نظر می‌رسد فرض تقلیل، وقتی که اندازه‌گیری صورت می‌گیرد درست باشد، در حالیکه دینامیک بطرز عجیبی در مورد آنچه هنگام اندازه‌گیری رخ می‌دهد، *غلط* است، و باز با وجود این به نظر می‌رسد در زمانی که اندازه‌گیری نمی‌کنیم، همین دینامیک، توصیف *درستی* از آنچه رخ می‌دهد، ارایه می‌کند."[۲]. این تقریر آلبرت هر چند لبّ مسألهٔ اندازه‌گیری را بیان می‌کند، ولی برای معرفیِ اجمالی سایر مدل‌های پیشنهاد شده برای مسألهٔ اندازه‌گیری بهتر است از صورتبندیِ دقیق‌تری که مادلین از مسألهٔ اندازه‌گیری ارایه کرده است، استفاده کنیم.

صورتبندی دقیق‌تر مسألهٔ اندازه‌گیری

این مایه توافق کلّی وجود دارد که مسألهٔ اندازه‌گیری مسأله‌ای مهم در مبانی فلسفی و بنیادی مکانیک کوانتوم است.[۳] امّا بررسی دقیق‌تر بیان‌گر این است که در صورت‌بندی دقیق این مسأله و راه‌حل‌های ارایه شده برای آن، این سطح از توافق وجود ندارد و تعابیر مختلفی از این مسأله ارایه شده است. مادلین در تحلیل مفیدی[۴] که از مسألهٔ اندازه‌گیری ارایه داد، آن را به سه مسألهٔ متفاوت، یعنی مسألهٔ نتیجه[۵]، مسألهٔ آمار[۶]، و مسألهٔ اثر[۷]، تجزیه و تأکید کرد که هر نظریهٔ ارایه شده برای مسألهٔ اندازه‌گیری باید از عهدهٔ حل این سه مسأله برآید و گرنه نمی‌توان آن را راه حلّی کامل درنظر گرفت. برای اینکه بتوانیم به بررسی شیوهٔ مواجههٔ مدل‌های مختلف برای

---

[۱] برای توضیح بیشتر در این مورد رک: (Feynman et al 1965: 3-3).

[2] (Albert 1992: 79)

[۳] هر چند که برخی مثل باب Bub (1974:140)، آن را شبه‌مسأله می‌دانند.

[4] Maudlin, Tim (1995), "Three measurement problems", *Topoi,* Vol. 14. No. 1, pp.7-15.

[5] Problem of outcome

[6] Problem of statistics

[7] Problem of effect

حل این مسأله بپردازیم بهتر است از تحلیل و تفکیکی که مادلین[1] از این مسأله ارایه کرده است استفاده کنیم تا هم مسأله قدری روشن‌تر شود و هم بتوانیم مدل‌ها و تعابیر مختلف را باهم مقایسه کنیم. بطور خلاصه می‌توان گفت مسألهٔ اندازه‌گیری حاصلِ جمع سه ادعای دو به دو ناسازگار زیر است:

الف- تابع موج کامل است.

ب- معادلهٔ تحول دینامیکی، یک معادلهٔ خطی است

ج- ما در نهایت در اندازه‌گیری به نتایج متعینی می‌رسیم.

مدل‌هایی که برای رفع تناقض بین این سه ادعا، اولی را کنار می‌گذارند، مدل‌هایی هستند که تحت عنوان کلّی متغیرهای نهان شناخته می‌شوند. آنها که ب را رها می‌کنند، مدل‌های تقلیلی هستند و دستهٔ آخر که به یک معنا ادعای ج را کنار می‌گذراند، یکی از انواع مدل *حالت نسبی* اورت هستند.

قبل از بررسی بیشتر، این سؤال مطرح است که مدل‌هایی که برای حل این مسأله ارایه شده‌اند به‌طور کلّی، و خصوصاً از نظر فلسفی، چه تفاوتی باهم دارند؟ حقیقت اینست که انتخاب هر کدام از این موارد تعهداتی متافیزیکی را به‌دنبال خواهد داشت که در نهایت می‌تواند به فیزیکی متفاوت از دیگری منجر شود. مثلاً اگر گزینهٔ متغیرهای نهان را انتخاب کنیم باید مشخص کنیم که این متغیرهای نهان چیستند و قوانین حاکم بر آنها چگونه‌اند؟ در حالیکه اگر مثلاً مدل‌های تقلیلی را، که مبتنی بر ارایهٔ یک معادلهٔ غیرخطی هستند، انتخاب کنیم، باید به این پرسش پاسخ دهیم که بالأخره کِی و چطور این تقلیل رخ می‌دهد؟ و در مورد سوّم هم باید بگوییم منظور از اینکه نتایج متعینی نداریم چیست و لااقل توضیحی برای این داشته باشیم که پس چرا در آزمایش‌ها "به‌نظرمان می‌آید" که با نتایج متعین مواجه می‌شویم؟ نکتهٔ جالب توجه در اینجا اینست که در اینجا به روشنی داد و ستد فیزیک و فلسفه را می‌توان دید. از یک طرف متافیزیک‌های متفاوتی که در پس هر یک از این مدل‌ها وجود دارد ما را به سمت طرح پرسش‌های فیزیکی متفاوتی هدایت می‌کند و از طرف دیگر می‌بینیم که چگونه نظریه‌پردازی‌های متفاوتِ متافیزیکی، امکان‌های متفاوت فیزیکی را فراهم می‌کند.

مادلین، در ادامهٔ تحلیل خود از مسألهٔ اندازه‌گیری، آن را به سه قسمت تحلیل کرد: مسألهٔ نتایج، مسألهٔ آماری و مسألهٔ اثر. این تفکیک و تقسیم‌بندی این حسن را دارد که مانع بدفهمی مسألهٔ اندازه‌گیری می‌شود، در

[1] Maudlin (1995:7-15)

عین حال برای ما مشخص می‌کند هر مدل ارایه شده برای مسألهٔ اندازه‌گیری باید بتواند تبیین مناسبی برای هر یک از این سه مؤلفه ارایه کند. اکنون به توضیح مختصر این سه مسأله می‌پردازیم:

مسألهٔ نتیجهٔ معین. در مکانیک کوانتوم ما با حالاتی مواجهیم که به اصطلاح *حالت برهم‌نهی* نام دارند. این حالت‌ها ترکیبی خطی از حالت‌های دیگر هستند و خود یک حالت مستقل به‌شمار می‌روند و با حالت‌هایی که ماهیتاً مستقل نیستند و *مخلوطی* از حالات دیگر هستند تفاوت دارند. مسأله اینجاست که پس از عمل اندازه‌گیری، سیستم مورد نظر ما یکی از حالات موجود در ترکیب خطی را اختیار می‌کند و منجر به یک نتیجهٔ معین از مقادیر ممکن برای کمیت مشاهده‌پذیر می‌شود.

مسألهٔ آمار. مسألهٔ آمار، این است که نتایجی که نظریه پیشنهاد می‌کند، بر اساس قاعدهٔ بورن، احتمالی‌اند. یعنی وضعیت‌های اندازه‌گیری که با توابع موج اوّلیهٔ یکسان توصیف می‌شوند، منجر به نتایج متفاوتی می‌شوند و احتمال حصول هر نتیجه با قاعدهٔ بورن داده می‌شود. خوب مسأله اینجاست که اگر تابع موج، به صورتی موجبیتی تحول یابد در این صورت دو سیستمی که با توابع موج یکسان شروع می‌کنند، قاعدتاً به توابع موج یکسانی نیز منتهی می‌شوند و اگر تابع موج کامل باشد در اینصورت توابع موج یکسان باید از هر جهت یکسان باشند، این درحالیست که به‌خاطر قاعدهٔ بورن، توابع موج یکسان ممکن است منجر به نتایج یکسانی نشوند.

مسألهٔ اثر. این مسأله ناشی از این است که در فرایند اندازه‌گیری، تقلیل نقش سومی را به عهده دارد و آن اینست که حالت سیستم عوض می‌شود و تحول آیندهٔ سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ یعنی حالت سیستم کوانتومی بعد از اندازه‌گیری باید ویژه‌حالت متناظر با نتیجهٔ اندازه‌گیری شده باشد. انگیزهٔ اساسی برای این وضعیت اینست که اندازه‌گیری‌ها قابل تکرارند، بنابراین بعد از انجام اندازه‌گیری، سیستم در حالتی خالص قرار می‌گیرد به گونه‌ای که اندازه‌گیری‌ای که بلافاصله پس از آن صورت می‌گیرد، *با قطعیت* منجر به همان نتیجه می‌شود. مثلاً اگر الکترونی با اسپین x در جهت مثبتِ x داشته باشیم و این الکترون وارد دستگاهی شود که مؤلفهٔ z اسپین را اندازه‌گیری می‌کند در اینصورت الکترون خروجی یا دارای اسپین z بالا یا پایین (یعنی در

جهت مثبت یا منفیِ z) است. حالا فرض کنید که نتیجهٔ اندازه‌گیری اوّل "بالا" باشد، نتیجهٔ اندازه‌گیری که بلافاصله بعد از آن صورت می‌گیرد نیز حتماً و قطعاً، "بالا" خواهد بود؛ این را *مسألهٔ اثر*[1] می‌گویند.

تحلیلی که از مسألهٔ اندازه‌گیری ارایه شد این انتظار را ایجاد می‌کند که هر طرحی که برای حل مسألهٔ اندازه‌گیری ارایه می‌شود، باید بتواند از عهدهٔ این سه مسألهٔ ناشی از مسألهٔ اندازه‌گیری برآید.

طرح‌های ارایه شده برای مسألهٔ اندازه‌گیری

در یک تقسیم بندی کلّی می‌توان گفت راهبردهای ارایه شده برای این مسأله یا ۱) تعبیر استاندارد را می‌پذیرند یا اساساً کاری به آن ندارند ولی برآنند که اصلاحی در دینامیک خطی نظریه اعمال کنند یا ۲) دینامیک خطی را می‌پذیرند و در تعبیر استاندارد اصلاحاتی وارد کنند، یا ۳) هم تعبیر استاندارد و هم دینامیک خطی را می‌پذیرند ولی سعی دارند تفاوت بین حالت خالص و مخلوط را برای مقاصد عملی قابل چشم‌پوشی جلوه دهند. به‌عنوان مثال نظریهٔ GRW[2] راهبرد اول را دنبال می‌کند. در حالیکه نظریهٔ متغیر نهان[3] بوهم[4]، تعبیر چند جهانی اورِت[5] و تعابیر وجهی[6] طریق دوم را طی می‌کنند و در نهایت نظریه‌های همدوس‌زدایی[7]، در مسیر سوم به حل معضل فوق می‌پردازند[8].

قبل از اینکه چنین مدل‌هایی با هدف خاص حل مسألهٔ اندازه‌گیری ارایه شود، در ابتدای ظهور و شکل‌گیری مکانیک کوانتوم تعبیر کپنهاگی به رهبری بور و همفکرانش دنبال شد که ما در فصل اول به آن می‌پردازیم. هر چند نمی‌توان نظام خیلی منسجمی در خصوص این تعبیر ارایه داد، این‌قدر می‌توان گفت که یکی از مهمترین ویژگی‌های آن "آموزهٔ مفاهیم کلاسیک" است، دایر بر اینکه باید از یک زبان روشن و واضح برای معرفت عینی استفاده کرد و این زبان نیز از طریق فیزیک کلاسیک، که در واقع فیزیکی است که آدمی در مقیاس‌های معمولِ روزمره با آن سر و کار دارد و در بیان تجارب خود ناگزیر آن را به‌کار می‌برد، در اختیار ما

---

[1] Problem of effect
[2] Ghirardi, Rimini, Weber (GRW)
[3] hidden variable
[4] Bohm
[5] Everrett's many-worlds interpretation
[6] modal interpretations
[7] دکتر شفیعی، به‌جای آن، واژهٔ 'همساززدایی' را پیشنهاد کرده‌اند.
[8] (Bub 1998)

قرار گرفته است. بطور خلاصه این تعبیر با در نظر گرفتن تمایز دنیای ماکرو و دنیای میکرو مدعی حل مسألهٔ اندازه‌گیری است.

توضیح خواهیم داد که شرودینگر برای اینکه نتایج خلاف شهود راه‌حل تعبیر کپنهاگی را نشان دهد *آزمایش فکری گربهٔ شرودینگر* را ارایه کرد تا نشان دهد اگر قرار باشد مکانیک کوانتوم در هر دو جهان میکرو و ماکرو صادق باشد از مواجهه با بعضی نتایج خلاف شهود گریزی نیست. در فصل یک همچنین به بیان تفاوت بین تعبیر کپنهاگی و آنچه تعبیر استاندارد خوانده می‌شود خواهیم پرداخت و توضیح خواهیم داد مشکلات تعبیر کپنهاگی، بسیاری از قائلین به آن را به سمت مدل‌های تقلیلی، که فون‌نویمان پیشتاز آن بود، سوق داد؛ هر چند این مرز (بین تعبیر کپنهاگی و تعبیر استاندارد) گاهی در نظر گرفته نمی‌شود و افراد در تحلیل‌های خود این دو را باهم خلط می‌کنند.

بر اساس فرمالیسم استاندارد که فون‌نویمان در کتاب *مبانی ریاضی مکانیک کوانتوم* ارایه کرد، باید دو قانون داشته باشیم: یکی برای زمانی که هیچ اندازه‌گیری صورت نمی‌گیرد و دیگری وقتی که اندازه‌گیری انجام می‌شود. او این دومی را تحت عنوان "اصل تقلیل" وارد اصول مکانیک کوانتوم کرد. ولی مشکل اینجاست که برای به‌کارگیری چنین راه‌حلّی، ابتدا باید مفهوم 'اندازه‌گیری' را مشخص کنیم تا بدانیم از کدام قانون باید استفاده کرد؛ به‌علاوهٔ اینکه خودِ "فرایند تقلیل" نیز مبهم و نامشخص است.

اگر اندازه‌گیری در اصل تقلیل، واقعاً یک برهم‌کنش فیزیکی معمولی باشد، پس لابد باید بتوان یک مدل فیزیکی برای آن ارایه کرد. در غیاب چنین مدلی کار ناتمام است و این اصل به‌تنهایی چیزی به ما نمی‌گوید جز اینکه بدون آن نمی‌توانیم نظریه را با نتایج تجربی تطبیق دهیم. اما ممکن است اصلاً آن را یک برهم‌کنش فیزیکی تلقی نکنیم. چنین برنامه‌ای به وارد کردنِ ذهن و شعور به عنوان عامل فرایند تقلیل انجامید که در راستای برنامهٔ فون‌نویمان، در اوایل دههٔ شصت میلادی با ویگنر، ادامه یافت و مبتنی بر این ایده بود که *شعور*، عامل تقلیل تابع موج است و باید به نحوی شعور را وارد فیزیک کنیم. امّا وارد کردن "شعور"، به‌عنوان عامل یک اختلال فعال، که یک اثر *فیزیکی* را روی یک حالت کوانتومی اعمال کند، برای بسیاری از فیزیک‌دانان قابل قبول نبود. از این رو برخی، با در نظر گرفتن فرایند تقلیل به‌عنوان یک فرایند کاملاً فیزیکی، به سراغ

"مدل‌های تقلیل دینامیکی"، که مشهورترین آنها مدل GRW است، رفتند که در فصل دومِ این رساله مورد بحث قرار گرفته است.

در مدل‌های تقلیل دینامیکی، که شکل اولیهٔ آن در سال‌های ۱۹۸۵ و ۱۹۸۶، با گیراردی[1] و ریمینی[2] و وبر[3]، ارایه شد و به نظریهٔ GRW شهرت دارد و انواع بعدیِ آن هر یک گونه‌ای تغییر یافته از این نظریهٔ اولیه به‌شمار می‌روند، برای ارایهٔ یک توصیف واحد از سطح میکرو و ماکرو، معادلهٔ دینامیکی استاندارد طوری اصلاح می‌شود که بعد از زمانی معین، شکل تابع موج عوض می‌شود، به نحوی که دامنهٔ یکی از جملات بزرگ می‌شود و بقیه به سمت صفر میل کنند. به این ترتیب حالت سیستم از یک حالت برهم‌نهی محض به یکی از حالات محض مشخص و متعینِ مندرج در حالت مخلوط تقلیل می‌یابد. به اعتقاد طرفداران این نظریه، اصلاح معادلهٔ دینامیکی به این شکل موجب می‌شود که تقلیل تابع موج *به‌طور خود به خود* صورت گیرد و امکان ارایهٔ یک توصیف واحد هم در سطح میکرو و هم ماکرو فراهم شود. در ارزیابی این مدل به مشکلات آن مثل فقدان تبیینی برای عدم تقارنِ تعین مکان، برگشت‌ناپذیری، دنباله‌های تابع موج و تعمیم نسبیتی اشاره خواهیم داشت.

غیر از این تعبیر و تعبیر استاندارد، تعابیر دیگری نیز وجود دارد که با فرض کامل بودن مکانیک کوانتوم ارایه شده است؛ یکی از آنها برنامهٔ همدوسی‌زدایی است، که آن نیز در همان چارچوب و فرمالیسم و تعبیر استاندارد برای حل مسألهٔ اندازه‌گیری ارایه شده است و ما در فصل سوم به آن خواهیم پرداخت. این مدل مبتنی بر این پیش‌فرض است که جهان را می‌توان به "سیستم" و "محیط"، که به‌عنوان "بقیهٔ" سیستم در نظر گرفته می‌شود، تقسیم کرد و از آنجا که هر چند درجات آزادی محیط تحت تأثیر و در ارتباط با مشاهدهٔ ما نیست، ولی در تحول حالت سیستم دخالت دارد. در این مدل، برخلاف رویکرد کلاسیک، سیستم مورد مطالعهٔ منزوی در نظر گرفته نمی‌شود، بلکه در فرایند اندازه‌گیری، برهم‌کنش سیستم کوانتومی با محیط اطراف خود را نیز باید لحاظ کرد، چون همین برهمکنش است که موجب گذار سیستم از حالت‌های برهم‌نهی کوانتومی به حالات متعین کلاسیک می‌شود. توضیح خواهیم داد که هر چند، حداقل برای برهه‌ای از زمان و برای افرادی این رویکرد، از این نظر که در چارچوب نظریهٔ استاندارد به مسألهٔ اندازه‌گیری می‌پردازد، جذابیت داشته است، با

[1] Ghirardi
[2] Rimini
[3] Weber

وجود این بسیاری از همان افرادی که ابتدا به این نظریه اقبال داشتند، در حال حاضر آن را راه‌حل مناسبی برای *حل* مسألهٔ اندازه‌گیری نمی‌دانند[1].

از طرف دیگر ارایهٔ یک راه‌حل برای مسألهٔ اندازه‌گیری، برای آن دسته که استراتژی تغییر تعبیر مکانیک کوانتوم را دنبال می‌کنند، به این امر بستگی دارد که مکانیک کوانتوم را نظریه‌ای کامل بدانیم یا ناقص. مدل حالت نسبی، که در فصل چهارم به آن می‌پردازیم، با استراتژی تغییر تعبیر مکانیک کوانتوم، با فرض کامل بودن توصیف تابع موج، برای حل مسألهٔ اندازه‌گیری پیشنهاد شده است. اورت در ۱۹۵۷، در واکنش به مسألهٔ اندازه‌گیری، امکان صدق معادلات دینامیکی حرکت را برای کلّ جهان مطرح کرد و اصل تقلیل را کنار گذاشت و برای توضیح اینکه چگونه ناظر در فرایند اندازه‌گیری در نهایت به نتایج متعین دست می‌یابد، این ایده را مطرح کرد که دستیابی به نتایج متعین تجربی ناشی از تجربهٔ ذهنی ناظرانی است که خود آنها را باید به عنوان یک سیستم فیزیکی، که با مکانیک کوانتوم توصیف می‌شوند، در نظر گرفت.

مدل حالت نسبی این تفاوت را با تعبیر استاندارد دارد که در عین حال که تابع موج را توصیف کاملی از واقعیت فیزیکی می‌داند، زبان کلاسیک را برای توصیف اندازه‌گیری مناسب نمی‌داند. البته انتظار این است که این نظریه توضیح دهد اگر *در واقع* اصلاً *نتایج متعینی* وجود ندارد، پس چرا حداقل اینطور "به‌نظر می‌رسد"؟ ولی در پاسخ به این پرسش، به‌دلیل ابهاماتی که در نظریهٔ اورت وجود داشت، بازسازی‌های مختلفی از آن صورت گرفت که به نظریه‌های چندجهانی و چند ذهنی و تک‌ذهنی و حداقلی مشهور شد؛ این تعابیر مختلف به یک معنا پاسخ‌های مختلف به پرسش اخیر هستند. به‌عنوان مثال به‌دنبال کار اورت، دِویت[2]، تعبیری مشهور به *تعبیر چند جهانی* ارایه کرد که بر اساس آن باید دو مؤلفهٔ حالت برهم‌نهی را نمایش دو جهان فیزیکی مجزا بدانیم. ایده این است که در جریان اندازه‌گیری تعداد جهان‌های فیزیکی از یکی، به چندتا تکثیر پیدا می‌کند و هر یک از مؤلفه‌ها در یکی از این جهان‌ها، که کاملاً مستقل از هم هستند، رخ می‌دهد.

هر چند تابع موج، به‌صورت یک برهم‌نهی از حالات است، ولی نکته اینجاست که ناظر همهٔ اجزاء تابع موج را نمی بیند، بلکه تنها یک جزء آن را می‌بیند، در عین اینکه همهٔ اجزاء ممکن وجود دارند و همگی تحقق

[1] (Schlosshauer 2005:1268-69)
[2] Dewitt

یافته‌اند. هر گاه یک اندازه‌گیری صورت بگیرد، مثل اینست که جهان به مجموعه‌ای از جهان‌ها تقسیم می‌شود که هر کدام یک نتیجهٔ ممکن اندازه‌گیری را دربر دارند، یا به عبارتی در هر یک از جهان‌ها یکی از این نتایج ممکن تحقق یافته است و به همین دلیل چنین تعبیری به تعبیر چند جهانی معروف شده است.

یکی از مشکلات این تعبیر اینست که پاسخ به این پرسش که چه جهان‌هایی وجود دارد، به این بستگی پیدا می‌کند که چه جملاتی در بردار حالت کلّی وجود دارد و این امر خود به این بستگی دارد که بردار را در چه پایه‌هایی از فضا بنویسیم. درحالیکه در خود فرمالیسم مکانیک کوانتوم چیزی وجود ندارد که برای یکی از پایه-های خاص ارجحیتی قرار دهد. لذا اگر قرار باشد امری عینی در مورد این جهان‌ها وجود داشته باشد، باید به نحوی یک اصل کلّی به فرمالیسم اضافه شود تا یک پایهٔ خاص را به‌عنوان پایهٔ درست ارجحیت بخشد و این اصل در عین حال باید تضمین کند که جهان‌هایی را به ما نشان دهد که نتیجهٔ اندازه‌گیری به‌عنوان واقعیاتی در آن جهان‌ها باشند و لذا مشکل بتوان متغیرهای فیزیکی پیدا کرد که بتوانند چنین چیزی را برای ما فراهم کنند. اما اگر در پی‌گیری استراتژی تغییر تعبیر نظریه، مکانیک کوانتوم را نظریه‌ای کامل *ندانیم*، به دسته‌ای از نظریه‌ها می‌رسیم که نظریه‌های متغیرهای نهان خوانده می‌شوند. اگر مکانیک کوانتوم را ناقص در نظر بگیریم، می‌توانیم بگوییم سیستم قبل از اندازه‌گیری هم در آن حالت بوده است، ولی چون توصیف مکانیک کوانتوم ناقص بوده، به همین دلیل نتوانسته است حالت متعین ذره را برای ما مشخص کند و صرفاً یک برهم‌نهی از حالات ممکن را برای ما مشخص کرده است. اگر چنین فرضی را در پیش بگیریم در اینصورت تابع موج *دانش ما از سیستم* را توصیف می‌کند و تقلیل تابع موج دیگر یک تغییر فیزیکی و واقعی نیست، بلکه صرفاً یک تغییر معرفتی است؛ یعنی معرفت ما نسبت به حالت سیستم، قبل از انجام عمل اندازه‌گیری، صرفاً منحصر به یک برهم‌نهی از حالت‌های ممکن بود، و با وجود آنکه سیستم *واقعاً* در یک حالت معین قرار داشته است، ولی شناختی نسبت به این حالت متعین سیستم نداشتیم، امّا بر اساس فرض تقلیل، پس از انجام عمل اندازه‌گیری، ما نسبت به حالت متعین سیستم شناخت پیدا می‌کنیم؛ به این معنی تقلیل تابع موج بیانگر یک *تغییر معرفتی* است و از لحاظ *فیزیکی* تفاوتی بین وضعیت سیستم، قبل و بعد از اندازه‌گیری، وجود ندارد.

شاید در نظر اول چنین تعبیر و تلقی‌ای از تابع موج، جذاب و جالب باشد، اما مشکلات جدی در پی خواهد داشت. مثلاً نمی‌توانیم با چنین تعبیری از تابع موج پدیدهٔ تداخل را توضیح دهیم. توابع موجی که تنها بیانگر